

氾濫流抵抗則の津波遡上への適用法*

中央大学研究開発機構 松富英夫

1. はじめに

津波氾濫流の先端部において摩擦損失係数の時間変化を考慮することの必要性が指摘されて久しい¹⁾。

移動床や流れの非定常性は抵抗則に影響し^{2),3)}、ひいては津波氾濫水密度^{3),8)}や津波荷重⁹⁾⁻¹³⁾、津波規模^{3),14)}の評価などに影響する。

移動床下の抵抗則の解明は定常流の場合でも難しい¹⁵⁾。ましてや、津波氾濫流のように非定常性がからむとその難しさはなおさらで、各種の氾濫事象毎に対応せざるを得ないかも知れない。

固定床下の沿岸域以深の津波に対する非定常性を考慮した抵抗則（波動抵抗則）は田中ら¹⁶⁾により議論されている。抵抗則までには至っていないが、沓澤ら¹⁷⁾は固定床下の三次元数值解析に基づき、津波遡上域を含めて、間接的に津波の押し引き過程内で摩擦損失係数が時間変化するかも知れないことを示唆している。

津波氾濫流に対して移動床と非定常性の両方を考慮した議論が開始された。例えば、松富^{2),3)}は水理実験に基づいて入射フルード数 F_n と底質土砂粒径 d_{50} に依存する氾濫流抵抗則を暫定的に提示している。ただし、底面勾配にも依存する抵抗則までには至っていない。また、移動床下の氾濫流の摩擦損失係数は移動床下の定常流のものに比べて大きいことを実証し、津波遡上解析、ひいては津波荷重解析では摩擦損失係数と氾濫水密度の時間変化を考慮することの必要性を指摘している。

移動床下の津波氾濫事象が周期（規則波）運動とは考えにくい。津波は過渡波であり、もともと周期波ではない。しかし、汀線から最大遡上位置までの氾濫運動を四半周期の波運動と仮定し、既存の周期波の抵抗則における考え方を適用することで、波源域から遡上域までの全域において一貫性を保持させた移動床下の氾濫流抵抗則の適用法を理論的に議論できるかも知れない。

本研究は以上を背景に松富³⁾の移動床下の氾濫流抵抗則の津波遡上への適用性と適用法を遡上実験との比較などを通して理論的に検討することを目的とする。

2. 津波遡上への適用性

松富ら^{3),14)}は氾濫水密度 ρ の影響を考慮した3つの津波遡上理論を提示している。汀線における入射段波高 h_i 、一様な斜面勾配 i 、土砂粒径 d_{50} に依存する現状では一番普遍性が高いと判断される理論を理論I、 h_i と i 、 ρ に依存する理論を理論II、 h_i と i 、 ρ 、摩擦損失係数 K に依存する

理論を理論IIIとする。ここで、 d_{50} は混合粒径を想定しない限り一定値で、 ρ と K は遡上過程平均の一定値である。

理論Iと理論IIIは級数解で、理論IIは解析解である。理論IIから遡上過程平均の ρ と K を h_i と d_{50} の陽関数として求めることができる（後述）。ここで、元々の ρ と K は入射フルード数 F_n と d_{50} に依存し、 i の影響は考慮されていない。この遡上過程平均の ρ と K を理論IIIにおける ρ と K の近似値として用いることにして、3理論は何れも h_i 、 i 、 d_{50} に依存することになり、各理論の直接比較などの検討や議論ができることになる。

先ず、汀線における入射段波高 h_i 、斜面勾配 i 、土砂粒径 d_{50} に依存する理論Iを考える。

理論Iでは普遍的と考えられる次式を用いている²⁾。

$$\frac{\rho_w}{\rho} = 1 - K F_{ri}^2 \quad (1)$$

ここで、 ρ_w は清水の密度である。具体的には式(1)を満足する次の実験式(2)と(3)を用いている³⁾。

$$K = 0.00255 F_{ri}^{-1} \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_w}{\rho} = 1 - 0.00255 F_{ri} \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 h_i は入射氾濫水深、 $F_{ri} < 247 \sqrt{d_{50}/h_i}$ である。式(2)については妥当性の照査が行われている¹⁸⁾。式(2)と(3)の計算図を図-1と2に示す。

式(2)は移動床下の氾濫流先端部における空間平均の氾濫水密度の実験値を用いて得られており、先端部空間平均の移動床下の氾濫流抵抗則と言える。今後、実験値の蓄積により実験係数が更新されることがあるかも知れないが、本研究対象の津波遡上理論の近似度を考慮すれば、式形は不变と考えられる。この状況は式(3)も同じである。

式(2)と(3)が提案された実験と理論の比較では、理論における汀線での入射段波高 h_i を次式で評価する³⁾。これは3理論で共通である。

$$h_i = h_i + \frac{u_i^2}{2g} \quad (4)$$

ここで、 g は重力加速度で、 h_i には実験における汀線（遡上斜面始点）での入射氾濫水深 h_i を、入射氾濫流速 u_i には実験における氾濫流先端移動速度を用いる³⁾。

理論Iの計算では土砂粒径 d_{50} の情報も必要で、実験における遡上斜面は固定床なので³⁾、斜面粗度（相当粗度

*Method for applying frictional resistance law of inundation flow over a movable bed to tsunami run-up by Hideo MATSUTOMI

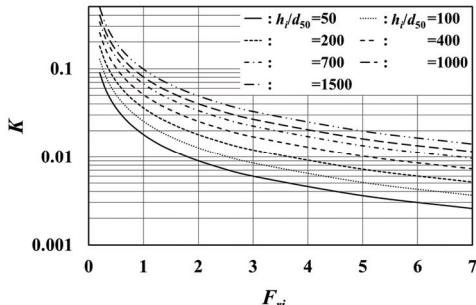


図-1 沈澁流摩擦損失係数Kの評価実験式(2)の計算図

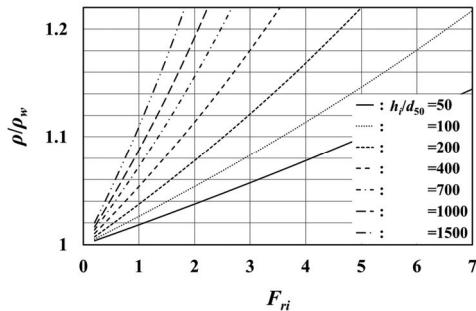


図-2 沈澁水密度ρの評価実験式(3)の計算図

k) の d_{50} (=1.0 mm¹⁴⁾ を用いる。

次に理論IIを考える。理論IIにおいても式(I)の関係を用いている。ただし、理論Iにおける d_{50} の代わりに沈澁水密度 ρ を用いており、沈澁水密度は遡上過程平均の一一定値としている。その平均値評価式は次のようにして導出される。

図-3に示す理論モデルにおける沈澁流先端部の後端位置 $x=\xi$ での沈澁水深 H と沈澁流速 U は各々次式である¹⁴⁾。

$$H = \frac{1}{g} \left(c_1 - \frac{1}{2} U - \frac{1}{2} i g t \right)^2 \quad (5)$$

$$U = 2c_1 - i g t - 8X g t \quad (6)$$

ここで、 $X = (1 - \rho_w / \rho) / (4 + \rho_w / \rho)$ の一定値である。

式(5)と(6)から次式が得られる。

$$H = 16X^2 g t^2 \quad (7)$$

遡上開始時を $t=0$ とすれば、最大遡上距離時の時間 t_m は沈澁流速 $U=0$ として得られ、次式となる。

$$t_m = \frac{2c_1}{(i+8X)g} \quad (8)$$

したがって、遡上過程平均の沈澁流速 U_{mean} は次式となる。

$$U_{mean} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} U dt = c_1 \quad (9)$$

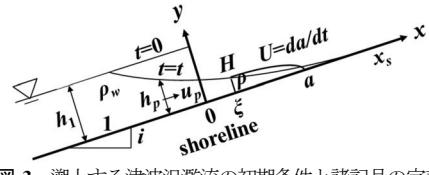


図-3 遡上する津波沈澁流の初期条件と諸記号の定義

表-1 実験値³⁾と計算条件

実験 ケース	h_i (cm)	F_n (-)	L_R (cm)	h_1 (cm)	i (-)	d_{50} (mm)	ρ/ρ_w (-)	K (-)
Case 10	5.46	2.02	207	18.11	0.1296	1.00	1.036	0.00077
Case 11	5.84	1.99	186	19.17	0.1296	1.00	1.037	0.00082
Case 12	4.43	2.40	197	17.89	0.1296	1.00	1.035	0.00076

この沈澁流速は次の時間 t_{mean} に形成される。

$$t_{mean} = \frac{c_1}{(i+8X)g} \quad (10)$$

したがって、沈澁水密度の平均値評価式は次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{\rho_w}{\rho} &= 1 - 0.00255 F_n \left(\frac{h_1}{d_{50}} \right)^{0.5} = 1 - \frac{0.00255}{\sqrt{gd_{50}}} U_{mean} \\ &= 1 - 0.00255 \left(\frac{h_1}{d_{50}} \right)^{0.5} \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 d_{50} は理論Iとの一貫性から斜面粗度のものを用いる。

理論IIIを考える。理論IIIでは式(I)の関係を用いていない。すなわち、摩擦損失係数 K と沈澿水密度 ρ は連動していない。その代わりに摩擦損失係数と沈澿水密度を遡上過程平均の一一定値としている。理論IIIの計算では近似的であるが理論IIに基づく式(11)から得られる沈澿水密度と理論IIIに基づき次のようにして導出される摩擦損失係数の平均値評価式（後述の式(14)）から得られる摩擦損失係数を用いることにする。

遡上過程における任意時刻 t の入射フルード数 F_n は式(6)と(7)から次式となる。

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gH}} = \frac{c_1}{2Xgt} - \frac{i+8X}{4X} \quad (12)$$

式(12)の n に式(10)の遡上過程平均の沈澿流速時 t_{mean} を代入すれば、次の t_{mean} 時の入射フルード数 $F_{n mean}$ が得られる。

$$F_{n mean} = \frac{i+8X}{4X} \quad (13)$$

したがって、摩擦損失係数の遡上過程平均値 K_{mean} の評価式は次式となる。

$$K_{mean} = 0.00255 F_{n mean}^{-2} \left(\frac{h_1}{d_{50}} \right)^{0.5} = 0.00255 \left(\frac{4X}{i+8X} \right)^2 \left(\frac{h_1}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (14)$$

ここで、理論Iや理論IIとの一貫性から沈澿水密度や摩擦損失係数の評価における d_{50} は斜面粗度のものを用いる。

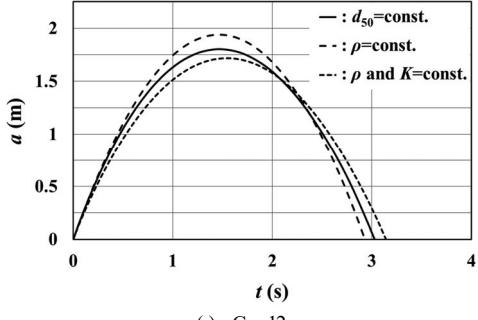
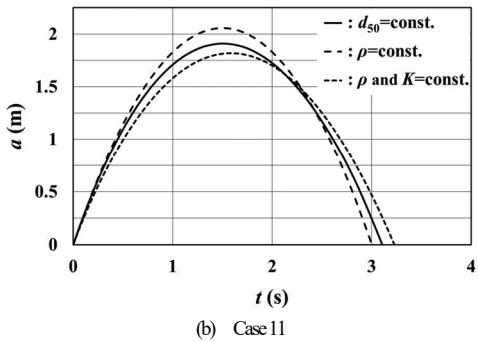
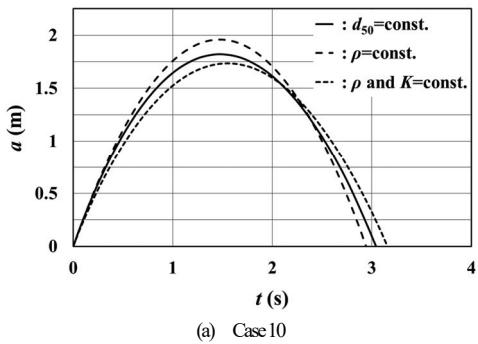


図-4 各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例

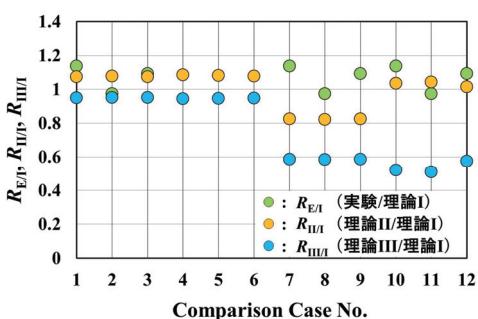


図-5 実験、理論II、理論IIIの理論Iとの遡上距離比

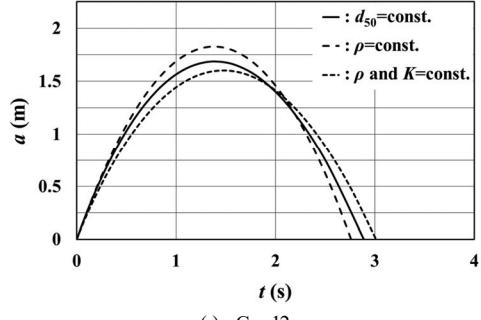
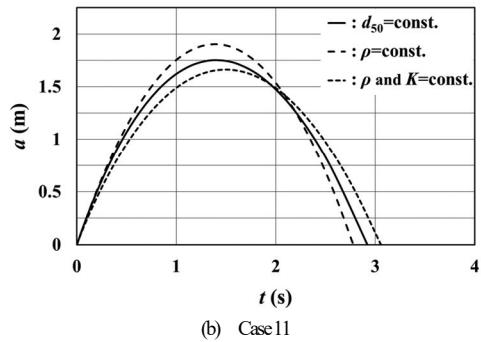
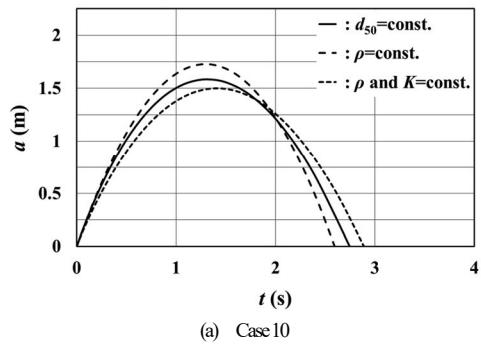


図-6 仮想した遡上斜面における各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例

以上のようにして評価される各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例を図-4に示す。表-1に理論計算の諸条件とその前提となった実験値³⁾を示す。図は上から順に氾濫流実験Case 10~12である。また、遡上距離 L_R に関して理論Iによるものと実験、理論IIや理論IIIによるものとの比較例 (R_{EI} =実験/理論I, $R_{II/I}$ =理論II/理論I, $R_{III/I}$ =理論III/理論I) を図-5のComparison Case No. 1~3に示す。図中には以降の検討結果 (Comparison Case No. 4~12) も示してある。ただし、完全に同じ条件下での実験と理論の比較は実験が難しく、現状ではできないことを断つておく³⁾。

両図から、1) 理論II, 理論I, 理論IIIの順に遡上距離が長く、汀線から最大遡上距離位置までに達する時間が短い、2) 理論IIは理論Iよりも、理論Iは理論IIIよりも実験との適合度がよい（平均的に実験値は理論IIの0.99倍、理論Iの1.07倍、理論IIIの1.12倍）、3) 2)の結果は初期条件（式(4)）の決め方や氾濫流抵抗則が妥当であることを示している、4) 普遍性が最も高い理論IIは3理論の中で基準となる理論と考えられ、遡上過程平均の氾濫水密度一定はやや長めの遡上距離を与える、5) 遡上過程平均の摩擦損失係数一定は氾濫水密度の長めの遡上距離を与える傾向を優に打消すほどの短めの遡上距離を与えることが判る。

考察1)と2)における理論IIIの結果には摩擦損失係数と氾濫水密度として理論IIに基づく遡上過程平均のものを近似的に用いていることが影響しているよう。また、考察1)はこれまでの摩擦損失係数を時間的に一定とする津波数値計算に改善の余地が、特に遡上域において存在することを示唆している。

考察1)の前半部、2)と4)の理由として、遡上過程平均の摩擦損失係数や氾濫水密度を用いていることが考えられる。本理論モデルでは、氾濫流が遡上するにつれて、摩擦損失係数は大きく、氾濫水密度は低くなり³⁾、遡上過程平均より少し汀線（初期）側のものを用いることで考察1)の前半部、2)と4)の件は改善される。とは言え、何れの理論も実験との差が高々12%以内であり、理解のし易さや活用の容易さの点から遡上過程平均の採用が推奨される。その他の理由として斜面粗度 d_0 の採用値の妥当性が考えられる。

考察5)の氾濫水密度より摩擦損失係数の方が遡上距離への影響が大きいことは理論IIIの特性検討においてすでに確認済みである¹⁴⁾。

理論Iが実験の遡上距離 L_R をよく説明できることを確認した。そこで、遡上斜面も汀線までと同じ土砂粒径の移動床と仮想し、理論Iの遡上距離を真値と考え、仮想した場合においても理論IIと理論IIIが図-4や5と同傾向を示すかどうかを検討する。この場合、斜面粗度（相当粗度 k ）は3 d_0 となる³⁾。

検討結果を図-6と図-5中のComparison Case No. 4~6に示す。両図から、1) 理論Iの遡上距離が短め（約9%減）となっていること、2) 遡上距離比は図-4の場合とほぼ同じ

（平均的に理論IIと理論IIIは順に理論Iの1.08倍と0.95倍）であることが判る。1)の仮想した場合において遡上距離が短くなることは想像に難くない。2)は理論I、理論II、理論IIIの遡上距離に関する相互関係が遡上斜面の状況に依存しないことを示している。今後、これらの判断をより確かなものとするため、ここで仮想した条件における遡上距離 L_R の実験値取得が望まれる（1例存在する³⁾）。

3. 津波遡上への適用法

「土砂粒径は d_0 という一定粒径でよいか」という疑問を除けば、理論Iの活用に特段の問題はない。理論IIは3理論の中で一番現実的で、活用が容易でもある。

理論IIでは氾濫水密度 ρ を、理論IIIでは氾濫水密度と摩擦損失係数 K を遡上過程平均の一定値としている。

ところで、固定床下の周期波の摩擦損失係数 f_w は地点毎の最大底面せん断応力と波動境界層上端における最大流速を用いて定義されるようである（定義式における定数係数がいくらくか、例えれば1/1, 1/2, 1/8かに要注意）¹⁹⁾。その最大底面せん断応力と最大流速は波峰位相で形成されると考えてよいようで、 f_w は時間的に不变（周期代表値）として取り扱われるようである。したがって、遡上過程においても氾濫水密度や摩擦損失係数が時間的に不变（一定値）でよいならば、周期波における取扱いとの一貫性を考慮して、以下の考え方により汀線 $x=0$ （初期 $t=0$ ）におけるそれらの評価値を用いることが推奨されよう。

津波の遡上氾濫現象を汀線位置を中心とした四半周期の周期波現象と仮定する。本理論モデル^{3) 14)}の氾濫流は汀線で最大の入射氾濫水深 h_i と氾濫流先端移動速度を形成し、 h_i を汀線における津波の入射段波高とすれば、両者はそれぞれ $4h_i/9$ と $2\sqrt{gh_i}$ である²⁰⁾。松富が提案している移動床下の氾濫流の摩擦損失係数 K と氾濫水密度 ρ の評価実験式(2)と(3)では入射フルード数 F_n の氾濫流速 u_i として氾濫流先端移動速度が採用されており、汀線における松富定義の入射フルード数は常に3の有限値となる。したがって、周期波における取扱いとの一貫性から、津波の遡上氾濫に対して汀線における松富の移動床下の氾濫流の摩擦損失係数や氾濫水密度を採用することにすれば、それらの評価実験式はそれぞれ次式となる。

$$K_{x=0} = 0.00255 F_n^{-1} \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} = 0.000567 \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (15)$$

$$= \frac{2}{9} \left(\frac{i+8X}{4X} \right)^2 K_{mean}$$

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho} \right)_{x=0} = 1 - 0.00255 F_n \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} = 1 - 0.0051 \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (16)$$

$$= 2 \frac{\rho_w}{\rho} - 1$$

式(15)と(16)にはそれぞれ遡上過程平均の式(14)と(11)との関係も示されている。両式から、それぞれ斜面勾配 i の値次第（ $\approx 2(3\sqrt{2}-4)X$ ）で $K_{x=0}$ と K_{mean} の大小関係が決まり、氾濫水密度は汀線でのものが常に高い³⁾ことが判る。氾濫水密度のこの傾向は、汀線でのものを用いれば、遡上距離 L_R は常に短めに評価されることを示す。

式(15)と(16)から評価される値を遡上過程の代表値として用いた場合の各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例を図-7に示す。図-4と同じく上から順にCase 10~12で

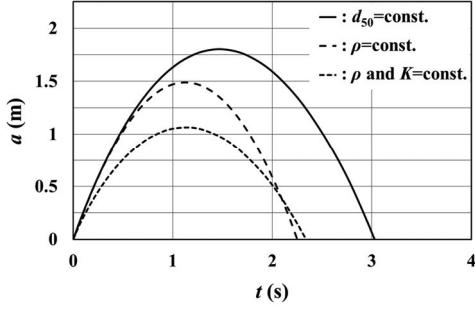
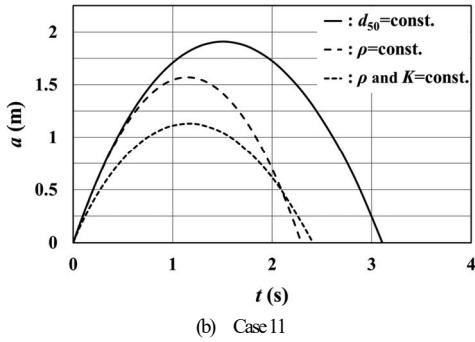
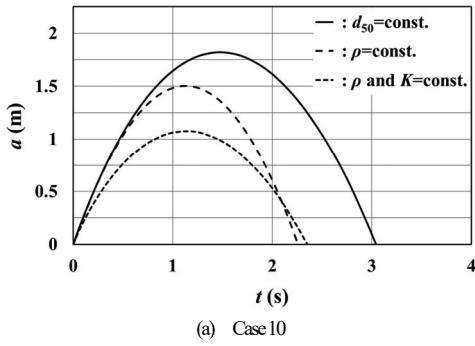


図-7 各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例（汀線における理論に基づく条件を使用）

ある。また、遡上距離 L_R に関して理論Iによるものと実験、理論IIや理論IIIによるものとの比較例を図-5のComparison Case No. 7~9に示す。両図から、摩擦損失係数や氾濫水密度として遡上過程平均の値を用いた図-4の場合に比べて、理論IIはかなり短め（約23%減）、理論IIIは大幅に短め（約39%減）の遡上距離を与えることが判る。これらの結果から、1)少なくとも遡上過程では摩擦損失係数や氾濫水密度が有意に時間変化すること、2)汀線（初期）における摩擦損失係数や氾濫水密度は遡上過程全体を表現し得るものではないことが推察される。

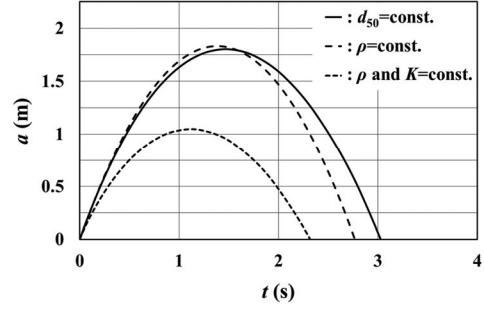
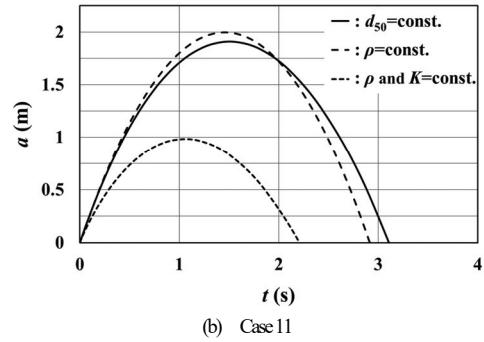
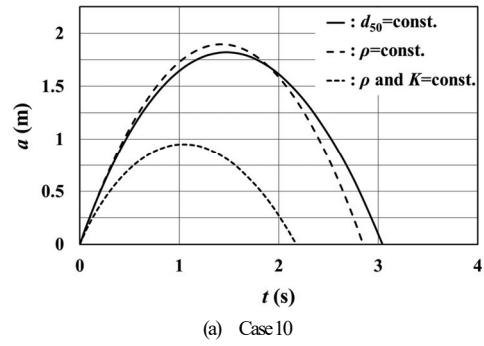


図-8 各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例（汀線における実験に基づく条件を使用）

式(4)の入射段波高 h_i が同じでも入射氾濫水深 h_i と入射氾濫流速 u_i の h_i への貢献度次第で流量や比力などが異なるので、汀線（初期）における氾濫水密度や摩擦損失係数として h_i と u_i の両実験値を個別に陽に活用する次の2式で評価されるものを用いる場合の検討も有益と思われる。

$$\left(\frac{\rho_w}{\rho}\right)_{x=0} = 1 - 0.00255 F_{ri} \left(\frac{h_i}{d_{50}}\right)^{0.5} = 1 - 0.00255 \left(\frac{F_{ri}^2}{\left(1 + \frac{1}{2} F_{ri}^2\right) d_{50}} \frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} \quad (17)$$

$$K_{x=0} = 0.00255 F_{ri}^{-1} \left(\frac{h_i}{d_{50}} \right)^{0.5} = 0.00255 F_{ri}^{-1} \left(\frac{1}{\left(1 + \frac{1}{2} F_{ri}^2 \right) d_{50}} h_i \right)^{0.5} \quad (18)$$

ここで、入射フルード数 F_{ri} は汀線における入射氾濫水深 h_i を用いたときのもの、 d_{50} は斜面粗度のものである。

式(17)と(18)から評価される値を遡上過程の代表値として用いた場合の各理論による氾濫流先端位置 $a(t)$ の比較例を図-8に示す。図は上から順にCase 10~12である。また、遡上距離 L_R に関して理論Iによるものと実験、理論IIや理論IIIによるものとの比較例を図-5のComparison Case No. 10~12に示す。両図から、氾濫水密度や摩擦損失係数として遡上過程平均の値を用いた図-4の場合に比べて、理論IIはやや短く、約4%減となって理論Iに近づき（理論IIが約3%長い）、理論IIIは顕著に短く、約44%減となり、図-7の入射氾濫水深 h_i と入射氾濫流速 u_i を理論的に決めた場合に比べてもやや短く、約8%減となることが判る。したがって、汀線における氾濫水密度や摩擦損失係数を用いる場合は、理論IIに関しては h_i と u_i を実験的に決める方が、理論IIIに関しては理論的に決める方がよいと言える。また、理論IIの場合は、同じ入射段波高 h_i でも h_i と u_i の h_i への貢献度次第で、汀線における氾濫水密度を用いても実験との対応がよい場合があることを示している。

以上の検討結果から総合的に判断して、現状では、理論IIや理論IIIの活用においては遡上過程平均の氾濫水密度や摩擦損失係数を用いることが推奨される。摩擦損失係数に対するこの考え方は基本的にこれまでの津波遡上数値解析におけるものと同じと言える。

4. おわりに

本研究で得られた主な結果は次の通りである。

- 1) 既報の津波遡上に関する理論I³⁾、理論II¹⁴⁾、理論III¹⁴⁾へ松富の移動床下の氾濫流抵抗則を適用し、各理論と氾濫流抵抗則の適用性を実験との比較や理論相互の比較を通して検討した。3理論の中で最も普遍性が高いと考えられる理論Iが実験の遡上距離 L_R をよく説明できること、移動床下の氾濫流抵抗則が妥当であることを確認した。
- 2) 摩擦損失係数 K や氾濫水密度 ρ の汀線 $x=0$ （初期 $t=0$ ）における評価値は、汀線における入射氾濫水深 h_i と入射氾濫流速 u_i の実験値を個別に陽に活用する場合の理論IIを除いて、遡上過程全体を表現し得るものではないことを確認した。一定値の K や ρ で遡上過程全体をより的確に表現しようとするならば、現状では遡上過程平均の値を用いることが推奨されることを示した。これは移動床下の氾濫流抵抗則に限るものでないと思われる。

謝辞：本研究にあたり科研費（基盤研究(C), 20K05041, 代表：松富英夫）の補助を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 松富英夫：陸上遡上津波の先端条件と先端部の抵抗係数、第28回海岸工学講演会論文集, pp.74-78, 1981.
- 2) 松富英夫：津波氾濫水密度の簡易評価法、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.75, No.2, pp.385-390, 2019.
- 3) 松富英夫：氾濫水密度の時間変化を考慮した津波遡上、東北地域災害科学研究、第58巻, 2022. (印刷中)
- 4) 松富英夫、川島峻：津波氾濫流の密度に関する基礎実験、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.71, No.2, pp.355-360, 2015.
- 5) 松富英夫、今野史子、齋川聖、鎌滝孝信、渡邊一也：津波氾濫水密度の土砂堆積や遡上高への影響、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.72, No.2, pp.397-402, 2016.
- 6) 松富英夫、今野史子、後村晃基、今藤晃太、鎌滝孝信、渡邊一也：津波氾濫水密度とその遡上距離や土砂堆積への影響に関する定量実験、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.73, No.2, pp.373-378, 2017.
- 7) 千葉裕太、三上輝、松富英夫：津波氾濫水密度の諸水理量への依存性、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, II-98, 2019 (CD-ROM).
- 8) Matsutomi, H. and Konno, F.: Experiments on the density of tsunami inundation water and its influence on the tsunami run-up and deposit, Proc. of Int'l. Conf. on Coastal Eng., No.36, Full Length papers, Paper 41, 2019.
- 9) 松富英夫、決得元基、齋藤雅大：開口部を有する鉄筋コンクリート造建物に働く津波流体力に関する基礎実験、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69, No.2, pp.326-330, 2013.
- 10) 松富英夫、小泉拓也、照井裕介、加藤広之、岩瀬浩之：定常と非定常実験の違いが胸壁越流後の津波の氾濫流やRC造建築物への波力に及ぼす影響、土木学会論文集B1（水工学），Vol.74, No.5, pp.1225-1230, 2018.
- 11) 松富英夫、岡田隼人、久保田友寛、今野史子：RC造建築物に作用する津波荷重の氾濫水密度への依存に関する基礎実験、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.74, No.2, pp.265-270, 2018.
- 12) 松富英夫、三上輝、千葉裕太：氾濫水密度と波周期の津波荷重への影響、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.75, No.2, pp.397-402, 2019.
- 13) 木瀬晃周、有川太郎：土砂・シルトを含んだ津波の波力に関する実験的研究、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.76, No.2, pp.385-390, 2020.
- 14) 松富英夫、有川太郎：津波遡上への氾濫水密度の影響、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.76, No.2, pp.391-396, 2020.
- 15) 土木学会水理委員会移動床流れの抵抗と河床形状研究小委員会：移動床流れにおける河床形態と粗度、土木学会論文報告集、第210号, pp.65-91, 1973.
- 16) 田中仁, Nguyen Xuan Tinh, 宋文世：津波の下での底面境界層発達と底面せん断力の特性、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.74, No.2, pp.313-318, 2018.
- 17) 菅澤佑樹, Nguyen Xuan Tinh, 渡辺一也, 田中仁：乱流モデルを用いた津波伝播の数値計算、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.74, No.2, pp.163-168, 2018.
- 18) 松富英夫：氾濫流抵抗則実験式の照査、土木学会東北支部技術研究発表会講演概要集, 2022. (印刷中)
- 19) 例えば、田中仁、首藤伸夫：一方向流を伴う振動流に関する実験、第29回海岸工学講演会論文集, pp.259-263, 1982.
- 20) 例えば、松富英夫：水平床の貯水部を持つダム破壊流れの斜面遡上、東北地域災害科学研究、第57巻, pp.47-52, 2021.